

УДК 621.319

*А. В. БЕСПРОЗВАННЫХ, И. А. МИРЧУК***ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СУДОВЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ПО УСЛОВИЯМ ОХЛАЖДЕНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ**

На современных судах с увеличением степени электрооборудования увеличивается число и сечение кабелей судовых сетей, что требует значительной площади для их прокладки. По сравнению с кабелями общепромышленного назначения судовые силовые кабели должны обеспечивать допустимую рабочую температуру токопроводящей жилы до 85 °С, что позволяет повысить на (25–30)% допустимую токовую нагрузку при оптимальных массогабаритных размерах. Рассеиваемая тепловая мощность в окружающую среду при протекании номинального тока по токопроводящей жиле существенным образом зависит от теплофизических свойств материалов изоляции и полимерной защитной оболочки, их толщины, температуры воздуха, условий охлаждения. Сформулирована задача оптимизации конструкции силового судового кабеля для обеспечения максимальной плотности теплового потока при фиксированной толщине (массе) полимерной изоляции. Приведены результаты оптимизации при варьировании толщины защитной полимерной оболочки. Представленная методика оптимизации конструкции одножильного силового кабеля по условиям обеспечения максимального рассеивания мощности теплового потока в окружающую среду может быть применена для кабелей бортовых систем, эксплуатирующихся в экстремальных условиях. Показана эффективность применения полимерных материалов с более высокими значениями коэффициента теплопроводности для защитной оболочки кабелей специального назначения.

**Ключевые слова:** судовые кабели, токовая нагрузка, линейная плотность теплового потока, целевая функция, толщина защитной полимерной оболочки, коэффициент теплопроводности, тепловое сопротивление, экстремальные условия, бортовые системы.

*Г. В. БЕЗПРОЗВАННИХ, І. А. МИРЧУК***ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ СУДНОВИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ЗА УМОВАМИ ОХОЛОДЖЕННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

На сучасних судах зі збільшенням ступеня електрообладнання збільшується число і перетин кабелів суднових мереж, що вимагає значної площі для їх прокладання. У порівнянні з кабелями загальнопромислового призначення суднові силові кабелі повинні забезпечувати допустиму робочу температуру струмопровідної жили до 85 °С, що дозволяє підвищити на (25-30)% струмове навантаження при оптимальних масогабаритних розмірах. Теплова потужність, що розсіюється в навколишнє середовище при протіканні номінального струму по струмопровідній жилі, істотно залежить від теплофізичних властивостей полімерних матеріалів ізоляції та захисної оболонки, їх товщини, температури повітря, умов охолодження. Сформульовано задачу оптимізації конструкції силового суднового кабелю для забезпечення максимальної щільності теплового потоку при фіксованій товщині (масі) полімерної ізоляції. Наведено результати оптимізації при варіюванні товщини захисної полімерної оболонки. Представлена методика оптимізації конструкції одножильного силового кабелю за умови забезпечення максимального розсіювання потужності теплового потоку в навколишнє середовище може бути застосована для кабелів бортових систем, що експлуатуються в екстремальних умовах. Показана ефективність застосування полімерних матеріалів з більш високими значеннями коефіцієнта теплопровідності для захисної оболонки кабелів спеціального призначення.

**Ключові слова:** суднові кабелі, струмове навантаження, лінійна щільність теплового потоку, цільова функція, товщина захисної полімерної оболонки, коефіцієнт теплопровідності, тепловий опір, екстремальні умови, бортові системи.

*G. V. BEZPROZVANNYKH, I. A. MIRCHUK***OPTIMIZATION OF DESIGN OF SHIP POWER CABLES WITH CONDITIONS OF COOLING IN OPERATION**

On modern ships, with an increase in the degree of electrical equipment, the number and cross-section of cables of ship networks increases, which requires a considerable area for their installation. Compared with cables for general industrial use, ship power cables should provide the allowable operating temperature of the conductive core to 85 °C, which allows increasing the allowable current load by (25–30)% at optimal weight and dimensions. The dissipated thermal power to the environment when the rated current flows through the conductive core is significantly dependent on the thermo physical properties of the insulation materials and the polymer protective sheath, their thickness, air temperature, cooling conditions. The task of optimizing the design of the power ship's cable is formulated to ensure maximum heat flow with a fixed thickness (mass) of polymer insulation. The optimization results for varying the thickness of the protective polymer shell are given. The proposed method of optimizing the design of a single-conductor power cable according to the conditions for ensuring the maximum dissipation of heat flow power into the environment can be applied to cables of onboard systems operating in extreme conditions. The efficiency of the use of polymeric materials with higher values of thermal conductivity for the protective sheath of special-purpose cables is shown.

**Keywords:** ship cables, current load, linear heat flux density, objective function, protective polymer shell thickness, thermal conductivity coefficient, thermal resistance, extreme conditions, onboard systems.

**Введение.** На современных судах с увеличением степени электрооборудования увеличивается число и сечение кабелей судовых сетей, что требует значительной площади для их прокладки. Масса кабелей, входящих в бортовую сеть, может достигать 1/3 от общей массы всего судового электрооборудования [1-3].

Кабели на борту судов часто подвергаются экстремальным условиям. Конструкция и материалы должны быть специально предназначены для решения этих сложных задач. Силовые судовые кабели используются для подвода электроэнергии от автономных электроэнергетических установок (дизель-генераторы, аккумуляторы и солнечные

© А. В. Беспрозванных, И. А. Мирчук, 2019

батареи) к исполнительным агрегатам (всевозможного рода электродвигателям и устройствам автоматики), для обеспечения освещения, как внутреннего, так и внешнего, для питания холодильных установок, кондиционеров, нагревателей и др.

Конструкция силовых судовых кабелей должна обеспечивать функционирование систем, в которых они используются, при всем диапазоне возможных условий эксплуатации, если обеспечивается электромагнитная совместимость.

По сравнению с существующими кабелями современные судовые силовые кабели должны обеспечивать допустимую рабочую температуру токопроводящей жилы до 85 °С [1, 3-6], что позволяет повысить на (25–30)% допустимую токовую нагрузку при оптимальных массогабаритных размерах.

Так, силовые судовые кабели на напряжение 3 – 20 кВ, предназначенные для стационарной прокладки в любых условиях на борту судов, изготовленные в соответствии с [5-6] (табл. 1, табл. 2), имеют высокую гибкость и малый радиус изгиба, что дает возможность использовать в условиях ограниченного пространства для монтажа.

При этом кабели не распространяют горение при групповой прокладке в пучках [3-6]. Кабели соответствуют требованиям SOLAS (Международная конвенция по охране человеческой жизни на море). Изоляция и защитная полимерная оболочка кабелей не содержат галогены и не распространяют горение: пожарная безопасность на борту судов имеет первостепенное значение. Огонь, дым, выбросы токсичных газов могут создать потенциальную и реальную угрозу для жизни и оборудования: риск взрывоопасности возрастает в малых и замкнутых пространствах (рис. 1).

Таблица 1 – Расчетные данные судовых силовых кабелей на напряжение 1,8/3,0 кВ

Сечение, токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Номинальный ток при прокладке на открытом воздухе, (А)	Наружный диаметр (мм)			Масса, (кг/км)
		мин.	ном.	макс.	
1 x 25	127	15,0	16,0	17,5	550
1 x 35	157	15,0	17,0	10,5	680
1 x 50	196	17,5	10,0	19,5	830
1 x 70	242	19,0	19,3	21,5	1 050
1 x 95	293	22,0	22,3	24,5	1 380
1 x 120	339	23,5	24,5	26,5	1 650
1 x 150	389	25,0	26,2	20,0	1 980
1 x 185	444	27,5	28,6	30,5	2 390
1 x 240	522	31,0	32,3	34,5	3 000
1 x 300	601	33,0	34,5	36,5	3 620
3 x 25	89	20,0	29,0	31,0	1 650
3 x 35	110	30,0	31,2	33,5	2 030
3 x 50	137	33,0	34,0	36,5	2 650
3 x 70	169	35,5	37,7	40,5	3 450
3 x 95	205	40,5	42,2	45,0	4 500
3 x 120	237	44,0	45,3	49,0	5 400
3 x 150	273	47,5	49,0	52,0	6 550

Таблица 2 – Расчетные данные судовых силовых кабелей на напряжение 6,0/10,0 кВ

Сечение, мм <sup>2</sup>	Номинальный ток при прокладке на открытом воздухе, (А)	Наружный диаметр (мм)			Масса, (кг/км)
		мин.	ном.	макс.	
1 x 25	127	22,0	23,0	24,5	850
1 x 35	157	23,0	24,0	26,0	980
1 x 50	196	24,0	25,1	27,0	1 160
1 x 70	242	26,0	27,2	29,0	1 140
1 x 95	293	28,0	29,1	31,0	1 750
1 x 120	339	29,5	30,8	33,0	2 040
1 x 150	389	31,0	32,4	34,5	2 380
1 x 185	444	33,0	34,4	36,5	2 810
1 x 240	522	35,5	37,1	39,5	3 420
1 x 300	601	38,0	39,5	42,0	4 140
3 x 25	89	43,0	44,7	47,5	3 210
3 x 35	110	45,5	47,1	50,5	3 700
3 x 50	137	47,5	49,2	52,5	4 320
3 x 70	169	51,5	53,3	56,5	5 280
3 x 95	205	55,5	57,5	61,0	6 430
3 x 120	237	59,5	61,4	65,0	7 530
3 x 150	273	62,5	64,8	69,0	8 720



Рис.1 – Фрагмент трассы кабелей на судне

Совокупность конструктивных особенностей и применяемых материалов судовых силовых кабелей должна обеспечивать комплекс электрических, механических, тепловых характеристик в соответствии с условиями эксплуатации при оптимальных массогабаритных размерах.

**Проблема оптимизации конструкции судовых силовых кабелей.** Силовые судовые кабели должны

иметь, с одной стороны, меньший вес и диаметр, а с другой, – большие токовые нагрузки. Толщина изоляции силовых судовых кабелей, также как и силовых кабелей общепромышленного назначения, регламентируется стандартами [3-6]. Так, согласно нормам, приведенным в [5], толщина изоляции судовых кабелей на напряжение 1,8/3,0 кВ выбирается из условий обеспечения механической, а не электрической, прочности кабеля, и зависит от материала изоляции (см. табл. 3).

Таблица 3 – Влияние материала изоляции на толщину изоляции судовых силовых кабелей напряжением 1,8/3 кВ [5]

Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Толщина изоляции, мм		
	Этиленпропиленовая резина (EPR S 95)	Твердая этиленпропиленовая резина (HERP)	Сшитый полиэтилен (XLPE)
10	2,2	2,0	2,0
16	2,2	2,0	2,0
25	2,2	2,0	2,0
35	2,2	2,0	2,0
50	2,2	2,0	2,0
70	2,2	2,0	2,0
95	2,4	2,0	2,0
120	2,4	2,0	2,0
150	2,4	2,0	2,0
185	2,4	2,0	2,0
240	2,4	2,0	2,0
300	2,4	2,0	2,0
400	2,6	2,0	2,0
500	2,8	2,2	2,2
630	2,8	2,4	2,4

Толщина наружной полимерной оболочки определяется в зависимости от внутреннего расчетного диаметра  $D$  под оболочкой кабеля [5]. Так, толщина оболочки в зависимости от конструктивного исполнения силовых кабелей на напряжение 1,8/3 кВ равна [5]:

а) для небронированных кабелей и бронированных кабелей с одной оболочкой:

$t_1 = 0,04D + 0,8$  мм при минимальной толщине 1,0 мм;

б) для небронированных кабелей с двумя оболочками:

$t_2 = 0,025D + 0,9$  мм при минимальной толщине 1,0 мм

в) для бронированных кабелей с двумя оболочками:

$t_2 = 0,025D + 0,6$  мм при минимальной толщине 0,8 мм, т.е. стандартами устанавливается минимальная толщина. При такой толщине обеспечивается требуемая механическая прочность конструкции кабеля.

Вместе с тем, отдаваемая (рассеиваемая) мощность в окружающую среду (например, в воздух), при протекании номинального тока по токопроводящей жиле, будет существенным образом зависеть от теплофизических свойств материалов изоляции и полимерной защитной оболочки, их

толщины, температуры воздуха, условий охлаждения (естественное либо принудительное).

Целью статьи является оптимизация конструкции силовых судовых кабелей при эксплуатации в закрытом помещении по условиям обеспечения максимального рассеивания мощности теплового потока в окружающую среду.

**Методика расчета теплопередачи в одножильном силовом кабеле коаксиальной конструкции.** Расчет теплопередачи в кабеле цилиндрической формы выполняется для установившегося режима, при котором тепловое состояние кабеля стабилизировано, тепловые свойства материалов не меняются во времени.

Для кабеля цилиндрической формы удобно использовать тепловой поток, отнесенный к единице длины цилиндрической стенки – линейную плотность теплового потока  $q_l$ . В общем случае линейная плотность теплового потока при теплопередаче через цилиндрическую стенку, состоящую из  $n$  слоев разной толщины и с разными теплофизическими свойствами, рассчитывается как [7-8]

$$q_l = \frac{\pi (T_g - T_{os})}{R_{\Sigma}} ; \quad (1)$$

где  $T_g$  – температура токопроводящей жилы, нагретой за счет протекания номинального тока  $I$ , К;  $T_{os}$  – температура окружающей среды – воздуха, К;  $R_{\Sigma}$  – суммарное тепловое сопротивление элементов кабеля и окружающей среды, (К·м)/Вт;  $q_l$  – линейный тепловой поток, рассеиваемый кабелем при протекании номинального тока  $I$  по жиле, Вт/м.

На рис. 2 показана конструкция силового одножильного коаксиального кабеля: 1 – токопроводящая жила, 2 – изоляция, 3 – металлический экран по изоляции, 4 – защитная полимерная оболочка. В силу больших значений теплопроводности металлов тепловыми сопротивлениями токопроводящей жилы и металлического экрана можно пренебречь:  $R_1 = R_3 \approx 0$  [9]. Считаем, что контакт между конструктивными элементами кабеля – совершенный. Температура на соприкасающихся поверхностях соседних слоев одинакова (см. рис. 2, эпюра качественного распределения температуры по слоям).

Общее (суммарное) тепловое сопротивление  $R_{\Sigma}$  определяется как [9-10]

$$R_{\Sigma} = R_2 + R_4 + R_{os} ; \quad (2)$$

где:  $R^2$  – тепловое сопротивление изоляции;

$$R_2 = \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln\left(\frac{2r_2}{2r_1}\right); \quad (3)$$

$$R_4 = \frac{1}{2\pi\lambda_4} \ln\left(\frac{2r_4}{2r_3}\right); \quad (4)$$

– тепловое сопротивление полимерной защитной оболочки;

$$R_{os} = \frac{1}{\alpha_{\text{эф}} * S_{ts}}; \quad (5)$$

– тепловое сопротивление  $R_{os}$  окружающего воздуха.

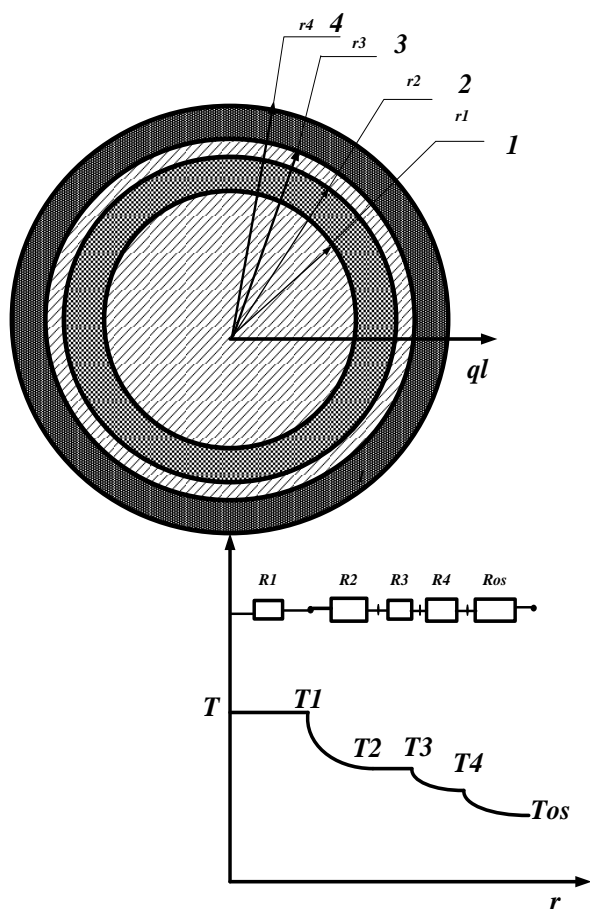


Рис. 2 – Тепловая схема замещения одножильного силового кабеля коаксиальной конструкции

В приведенных формулах (3) – (4) обозначено:  $\lambda_2$ ,  $\lambda_4$  – коэффициенты теплопроводности изоляции и защитной полимерной оболочки;  $2r_1$ ,  $2r_2 = 2r_1 + 2\Delta_{ins}$ ,  $2r_4 = 2r_3 + 2\Delta_j$ ,  $S_{ts} = \pi * (2r_4) * l_{pr}$  – диаметр жилы, диаметр изолированного провода, толщина изоляции, диаметр по полимерной защитной оболочке, диаметр по металлическому экрану, толщина защитной полимерной оболочки, поверхность охлаждения провода длиной  $l_{pr}$  соответственно.

Эффективный коэффициент теплоотдачи в окружающую среду за счет конвекции  $\alpha_c$  и излучения  $\alpha_{rad}$  определяется на основании [9]:  $\alpha_{ef} = \alpha_c + \alpha_{rad}$ .

В общем случае коэффициенты теплопроводности являются параметрами, зависящими от температуры. В предположении их постоянства наблюдается *логарифмический* закон изменения температуры по толщине изоляции и защитной полимерной оболочке, т.е. по радиусу (см. рис. 2).

**Линейная плотность теплового потока как целевая функция оптимизации конструкции кабеля.** Формулировка задачи оптимизации заключается в обеспечении максимального теплового потока при *фиксированной* толщине (массе) полимерной изоляции  $\Delta_{ins}$ . Другими словами, *целевой функцией* оптимизации является линейная плотность рассеиваемого теплового потока  $q_l$ . Варьируемый проектный параметр: толщина  $\Delta_j$  защитной полимерной оболочки. Следует учитывать определенные *ограничения*, связанные с технологичностью конструкции, ее механической прочностью в эксплуатации. Например, толщина оболочки не должна быть меньше некоторого минимума  $\Delta_{jmin}$ , приведенного в [5].

Алгоритм поиска оптимума заключается в исследовании зависимости  $q_l(\Delta_j)$ . При обнаружении максимума его положение определяется обычными способами поиска экстремума [11].

Расчеты показывают, что оптимум существует: зависимость линейного теплового потока от толщины полимерной защитной оболочки имеет максимум (см. рис. 3, кривые 2, 3 и 4). На рис. 3 приведены результаты расчета для изолированного провода (кривая 1) и одножильного экранированного кабеля коаксиальной конструкции (кривые 2, 3 и 4) для температуры медной жилы  $85^\circ\text{C}$  при естественной конвекции охлаждающего воздуха температурой  $20^\circ\text{C}$ . Эффективный коэффициент теплопередачи равен  $12 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ . Кривая 1 соответствует изолированному полиэтиленовому проводу с жилой сечением  $150 \text{ мм}^2$  при варьировании толщины изоляции  $\Delta_{ins}$ , т.е. при изменении  $r_2$  ( $K=r_2/r_1$ ). Кривые 2, 3 и 4 – одножильному экранированному кабелю коаксиальной конструкции с жилой сечением 150, 185 и  $240 \text{ мм}^2$  соответственно. Толщина изоляции равна 2 мм. Толщина полимерной оболочки  $\Delta_j$  – варьируется, т.е. при изменении  $r_4$  ( $K=r_4/r_1$ ).

Для изолированного провода оптимальная толщина полиэтиленовой изоляции, соответствующая максимальной рассеиваемой мощности, равна радиусу токопроводящей жилы (см. кривая 1 рис. 3), т.е. 6,9 мм для жилы сечением  $150 \text{ мм}^2$ . Для толщины изоляции, равной 2 мм, рассеиваемая мощность составляет всего 25% от максимального значения.

Для кабеля оптимальное значение толщины защитной полимерной оболочки для жилы такого же сечения  $150 \text{ мм}^2$  составляет порядка 190 мм, но при таком значении рассеиваемая мощность возрастает в 3,2 раза в сравнении с изолированным проводом.

Однако при этом значимо, в десятки раз, увеличиваются массо-габаритные размеры кабеля.

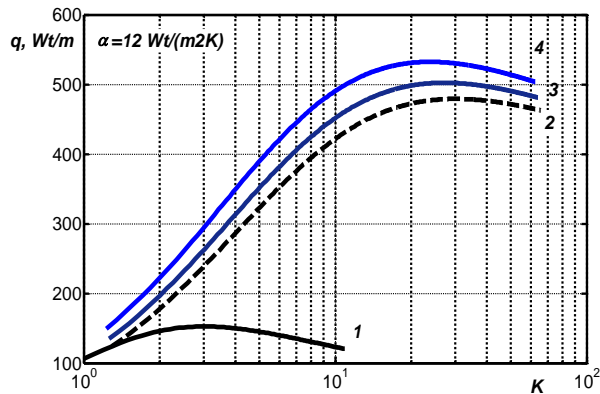


Рис. 3 – К выбору оптимальной толщины защитной полимерной оболочки в силовом судовом кабеле по условиям обеспечения максимального рассеивания мощности теплового потока в окружающую среду

Для рекомендуемой стандартами [5] минимальной толщины защитной полимерной оболочки, равной 1 мм, линейный тепловой поток существенно уменьшается. Однако остается больше на 30% в сравнении с изолированным проводом при условии одинакового сечения медной жилы, равной 150 мм<sup>2</sup> (сравни кривые 2 и 1 рис. 3). Важно, что при токовой нагрузке 389 А (см. табл. 1) и активном сопротивлении токопроводящей жилы, равном  $0,124 \cdot 10^{-3}$  Ом/м при температуре 85°C, выделяемая мощность  $P_{\text{выд}} = 389 \cdot 389 \cdot 0,156 \cdot 10^{-3} = 156$  Вт/м соизмерима с рассеиваемой. Другими словами, при такой толщине полимерной защитной оболочки обеспечивается устойчивый тепловой баланс.

Динамика изменения линейной плотности теплового потока от толщины обусловлена характером зависимостей составляющих и суммарного теплового сопротивления (см. рис. 4). Кривые, представленные на рис. 4, соответствуют:

а) для изолированного провода: 1 – для теплового сопротивления изоляции  $R_2$ , 2 – теплоотдачи в окружающую среду  $R_{os}$  и 3 – общего теплового сопротивления  $R_{\Sigma}$ ;

б) для кабеля с оболочкой: 1' – для теплового сопротивления изоляции  $R_2$ , 1'' – теплового сопротивления защитной полимерной оболочки  $R_4$ , 2' – теплоотдачи в окружающую среду  $R_{os}$ , 3' – общего теплового сопротивления  $R_{\Sigma}$ .

На рис. 5 представлено влияние коэффициента теплопроводности материала защитной полимерной оболочки [12-14] силового судового кабеля при эксплуатации при разной температуре в условиях естественной конвекции. Температура токопроводящей жилы равна 85°C. Кривая 1 – эффективный коэффициент теплопередачи равен 12 Вт/(м²·К), кривая 2 – 10 Вт/(м²·К) для коэффициента теплопроводности оболочки 2,5 Вт/(м²·К). Кривая 3 – эффективный коэффициент теплопередачи равен 10 Вт/(м²·К), кривая 4 – 12 Вт/(м²·К) для коэффициента теплопроводности оболочки 10 Вт/(м²·К).

Температура окружающего воздуха для 4-х случаев равна 20 °С. Кривая 5 – эффективный коэффициент теплопередачи равен 10 Вт/(м²·К) для коэффициента теплопроводности полимерной оболочки 10 Вт/(м²·К) и температуре окружающего воздуха 30 °С. Разработка и внедрение новых высоконаполненных антипиренами безгалогенных кабельных композиций обеспечивает требуемые значения теплофизических характеристик, в том числе и повышенные значения коэффициента теплопроводности [12-13].

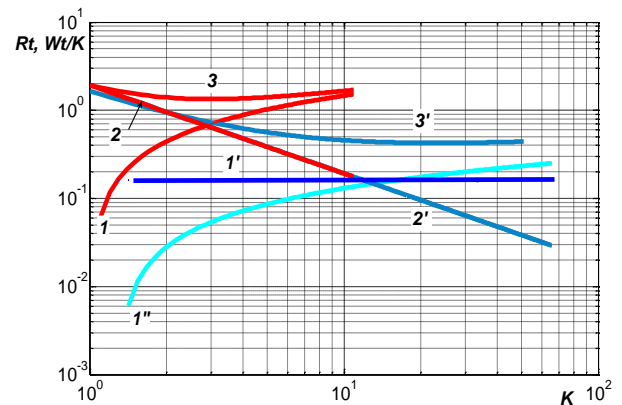


Рис. 4 – Влияние толщины изоляции и полимерной защитной оболочки на тепловое сопротивление изолированного провода и силового одножильного кабеля

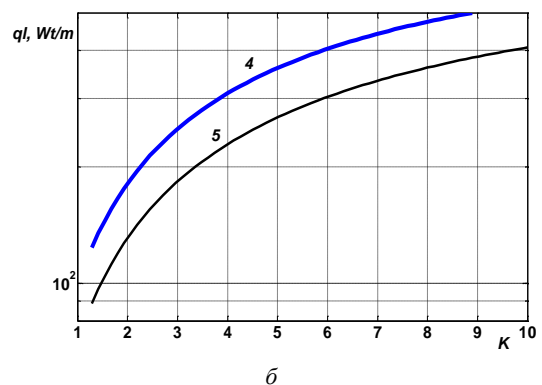
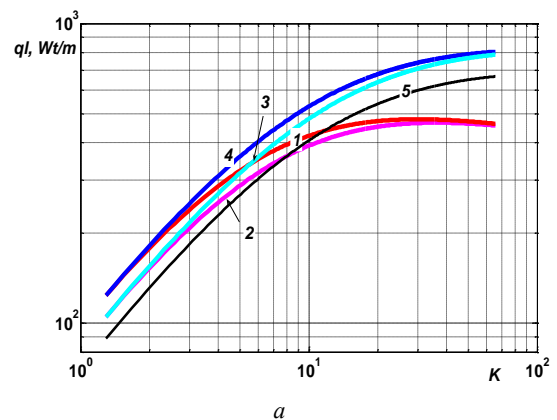


Рис. 5 – Влияние теплофизических характеристик материала защитной оболочки и условий эксплуатации на рассеиваемую тепловую мощность силового судового кабеля с медной токопроводящей жилой сечением 150 мм<sup>2</sup> и полиэтиленовой изоляцией толщиной 2 мм



При минимальной толщине полимерной защитной оболочки увеличение в 4 раза ее коэффициента теплопроводности приводит к росту рассеиваемой кабелем тепловой мощности на 30% (сравни кривые 4 и 5 рис. 5,б).

**Выводы.** Особенностью современных судовых силовых кабелей является обеспечение допустимой рабочей температуры токопроводящей жилы до 85 °С, что позволяет повысить на 25–30% допустимую токовую нагрузку при оптимальных массогабаритных размерах. Увеличенные токовые нагрузки обуславливают повышение эффективности рассеивания тепловой мощности в окружающую среду, что существенным образом зависит как от теплофизических свойств материалов изоляции и полимерной защитной оболочки, их толщины, так и температуры окружающего воздуха, условий охлаждения.

Сформулирована задача оптимизации конструкции силового судового кабеля для обеспечения максимальной плотности теплового потока при фиксированной толщине (массе) полимерной изоляции.

Приведены результаты оптимизации при варьировании толщины защитной полимерной оболочки. Показано, что для рекомендуемой стандартами минимальной толщины защитной полимерной оболочки силовых кабелей напряжением 1,8/3 кВ линейная плотность теплового потока существенно уменьшается, но остается больше на 30% в сравнении с изолированным проводом при условии одинакового сечения жилы.

Представленная методика расчета оптимальной толщины защитной полимерной оболочки силового судового кабеля по условиям обеспечения максимального рассеивания мощности теплового потока в окружающую среду может быть применена для оптимизации конструкции и других кабелей бортовых систем, эксплуатирующихся в экстремальных условиях.

Показана эффективность применения полимерных материалов с более высокими значениями коэффициента теплопроводности для защитной оболочки кабелей специального назначения.

### Список литературы:

1. Мирчук И.А., Безprozvannykh A.B. Обоснование оптимальной длительно допустимой рабочей температуры современных полимерных изоляционных композиций судовых кабелей / Вісник НТУ ХПІ. Енергетика: надійність та енергоефективність. - 2017. - № 31. - с. 52 – 58.
2. Безprozvannykh A.B., Мирчук И.А. Оценка возможности нормальной эксплуатации кабелей на основе витых пар в поливинилхлоридной защитной оболочке в условиях повышенной влажности и температуры. // Електротехніка і Електромеханіка. - 2017. - № 5. - с.51 – 56. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.08>.
3. ТУ У 31.3–00217099–009–2003 Кабели судовые. Технические условия.
4. IEC 60092 – 351:2004 Electrical installations in ships – Part 351: Insulating materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation, telecommunication and data cables. Third edition, 2004. – 20 p.

5. IEC 60092-353: Electrical installation in ships – Part: 353. Power cables for rated voltages 1 kV and 3 kV. Edition 4,0. 2016 – 09. - 46 p.
6. IEC 60092–360:2014 Electrical installations in ships – Part 360: Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables. Edition 1.0. 2014. – 54 p.
7. Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учебн. заведений / В.М.Леонов, И.Б.Пешков, И.Б.Рязанов, С.Д.Холодный. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
8. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. – Second Ed. Clarendon Press, London. – 2003. – 510 p.
9. Безprozvannykh A. B. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций / А. В. Безprozvannykh, Б. Г. Набока // Навчальний посібник. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2012. – 108 с.
10. IEC 60287-2-1:1994 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Thermal resistance - Calculation of thermal resistance.
11. Безprozvannykh A.B., Золотарев В.М., Антонец Ю.А. Влияние толщины изоляции защищенных проводов высоковольтных ЛЭП на их пропускную способность по току. // Електротехніка і Електромеханіка. – 2018. - № 2. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.07>.
12. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2011. – 416 стр.
13. Maziyar Sabet, Azman Hassan, Mat Uzir Wahit, Chantara Thevy Ratnam Thermal characterization of alumina trihydrate (ATH) and flammability studies of ATH filled low density polyethylene. Journal of industrial technology. Vol. 18(1), 2009, p. 83-93.
14. Bezprozvannykh G.V., Mirchuk I.A. Influence of technological dose of radiation on mechanical and electrical characteristics of polymeric insulation of wires / Problems of atomic science and technology. – 2018. - №5. – Pp. 40-44. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/147697>.

### References:

1. Mirchuk I.A., Bezprozvannykh G.V. Obosnovanie optimalnoy dlitelno dopustimoy rabochey temperatury sovremennykh polimernykh izolyatsionnykh kompozitsiy sudovykh kabelej [The rationale for the optimal long-term operating temperature of modern polymeric insulating compositions of ship cables] / Bulletin of NTU “KPI”: Energetics: nadinst and energy efficiency, 2017, no 31, pp. 52 – 58.
2. Bezprozvannykh G.V., Mirchuk I.A. Ocenka vozmozhnosti normalnoy ekspluatatsii kabelej na osnove vitykh par v polivinilhloridnoy zashitnoy obolochke v usloviyakh povyshennoy vlazhnosti i temperatury [The evolution of possibility of normal operation of cables based on twisted pairs in a PVC sheath in conditions of high humidity and temperature.] / Electrical engineering and Electromechanics. , 2018, no 5, pp. 51 – 56.
3. ТУ У 31.3–00217099–009–2003 Кабели судовые. Технические условия [Ship cables. Technical requirements].
4. IEC 60092 – 351:2004 Electrical installations in ships – Part 351: Insulating materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation, telecommunication and data cables. Third edition, 2004. – 20 p.
5. IEC 60092-353: Electrical installation in ships – Part: 353. Power cables for rated voltages 1 kV and 3 kV. Edition 4,0. 2016 – 09. - 46 p.
6. IEC 60092–360:2014 Electrical installations in ships – Part 360: Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables. Edition 1.0. 2014. – 54 p.
7. Osnovy kabelnoy tekhniki: uchebnik dlya stud. yissh. uchebn. zavedeniya [Fundamentals of cable technology: a textbook for students from higher training institutions] / V.M.Leonov, I.B.Peshkov, I.B. Ryazanov, S.D.Holodnyiy. - M.: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2006. - 432 p.
8. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. – Second Ed. Clarendon Press, London. – 2003. – 510 p.
9. Bezprozvannykh G.V. Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizolyatsionnykh konstruktsey [Mathematical models and methods for calculating electrical insulating structures] / G.V.Bezprozvannykh, B.G.Naboka // Navchal'niy posibnik. – Kharkiv, NTU «KhPI». – 2012. – 108 p.
10. IEC 60287-2-1:1994 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Thermal resistance - Calculation of thermal resistance.

11. Bezprozvannykh G.V., Zolotaryov V.M., Antonets Yu..A. Vliyaniye tolshiny izolyatsii zashishennykh provodov vysokovoltnykh LEP na ih propusknyuyu sposobnost po toku. [Effect of thickness of insulation of protected wires of high-voltage overhead transmission lines to their current carrying capacity.] / Electrical engineering and Electromechanics, 2018, no 2, pp. 41 – 46.

12. Mihajlin Ju. A. *Teplo-, termo- i ognestojkost' polimernykh materialov* [Heat, thermal and flame resistance of polymeric materials]. Saint Petersburg, Nauchnye osnovy i tehnologii Publ., 2011. 416 p.

13. Mazyiar Sabet, Azman Hassan, Mat Uzir Wahit, Chantara Thevy Ratnam Thermal characterization of alumina trihydrate (ATH) and flammability studies of ATH filled low density polyethylene. Journal of industrial technology. Vol. 18(1), 2009, p. 83-93.

14. Bezprozvannykh G.V., Mirchuk I.A. Influence of technological dose of radiation on mechanical and electrical characteristics of polymeric insulation of wires / Problems of atomic science and technology, 2018, no 5, pp. 40 – 44.

Поступила (received) 12.06.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Безпрозваних Ганна Вікторівна (Беспрозванных Анна Викторовна, Bezprozvannykh Ganna Victorivna)**— доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, тел. (057) 707 – 60-10; e-mail: [bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua](mailto:bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua).

**Мірчук Ігор Анатолійович (Мирчук Игорь Анатольевич, Mirchuk Ihor Anatoliyovych)**— науковий співробітник приватного акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості»; м. Бердянськ; тел.: (066) 828-85-54; e-mail: [garik710@ukr.net](mailto:garik710@ukr.net).